



# **Avaliação da Incerteza na Determinação dos Índices de Conforto Térmico PMV e PPD**

**Ana Robalo Cordeiro Sousa Oliveira**

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Mecânica**

**Júri**

Presidente: Prof. Doutor Pedro de Figueiredo Vieira Carvalho

Orientador: Prof. Doutor Manuel Carlos Gameiro da Silva

Vogais: Prof. Doutor José Joaquim Costa

**Setembro 2008**



# **Avaliação da Incerteza na Determinação dos Índices de Conforto Térmico PMV e PPD**

**Ana Robalo Cordeiro Sousa Oliveira**

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Mecânica**

## **Júri**

Presidente: Prof. Doutor Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira

Orientador: Prof. Doutor Manuel Carlos Gameiro da Silva

Vogais: Prof. Doutor José Joaquim Costa

**Setembro 2008**

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Doutor Manuel Carlos Gameiro, pela disponibilidade e atenção com que acompanhou o meu trabalho e o enriqueceu com preciosos esclarecimentos e sugestões, expresso a minha gratidão.

Aos Professores Doutores Pedro Carvalheira e José Costa, por terem acedido a avaliar este trabalho.

Ao meu colega João Pinto, agradeço a generosidade da sua ajuda constante e amiga.

Agradeço igualmente a todos os que, pelo seu estímulo e apoio, tornaram possível a realização deste trabalho.

## RESUMO

Apresenta-se um instrumento de cálculo numérico que permite, com recurso ao *software Labview*, definir a incerteza associada à determinação dos índices PMV (Predicted Mean Vote) e PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied). Estes índices (relativos a um ensaio experimental) calculam-se recorrendo ao Método de Fanger, e tendo por base a temperatura do ar ( $T_a$ ), a temperatura média radiante ( $T_r$ ), a velocidade do ar ( $V_a$ ), a humidade relativa ( $P_a$ ), o nível de actividade ( $M$ ) e o nível de isolamento do vestuário ( $I_{cl}$ ), bem como as respectivas incertezas. Através do Método de Monte Carlo, avalia-se a reprodutibilidade deste ensaio, obtendo-se, assim, um leque de valores de PMV e PPD, a partir dos quais se determina o desvio padrão e a incerteza expandida. Concluiu-se que os níveis de incerteza de PMV são bastante inferiores aos da incerteza de PPD e que há maior variação da incerteza de PPD com a alteração das condições iniciais de cálculo e suas incertezas, em relação à incerteza de PMV. Concluiu-se, ainda, que as incertezas dos índices de avaliação de conforto térmico estão mais dependentes da variação das variáveis iniciais do que da variação das suas incertezas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Método de Fanger, Índices PMV e PPD, Conforto Térmico, Método de Monte Carlo, Incerteza

## ABSTRACT

A *Labview*-based numerical calculation procedure allowing the definition of the statistical uncertainty associated with the determination of the PMV (Predicted Mean Vote) and PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) indices is presented and tested. These indices (relative to an experimental run) are calculated through the Fanger Method, using the temperature ( $T_a$ ), the mean radiant temperature ( $T_r$ ), the air velocity ( $V_a$ ), the humidity ( $P_a$ ), the metabolic rate estimation ( $M$ ) and the clothing isolation level ( $I_{cl}$ ) as input values. The reproducibility of the whole procedure is evaluated by means of the Monte Carlo method: a range of PMV and PPD values is obtained, thus leading to the determination of the corresponding standard deviation and associated statistical uncertainty.

We have come to the conclusion that the PMV levels of uncertainty are fairly inferior to the levels of PPD uncertainty and that the variation of PPD uncertainty depends on the initial conditions of calculation more than the PMV uncertainty does.

Another conclusion is that the uncertainties of the indices of evaluation of the thermal comfort are more dependent on the variation of the initial variables than on the variation of their uncertainty.

**KEYWORDS:** Fanger Method, PMV and PPD Indices, Thermal Comfort, Monte Carlo Method, Uncertainty.

# ÍNDICE

1 – Introdução	1
2 – Conforto Térmico	3
2.1 – Conceito	3
2.2 – Balanço Térmico do Corpo Humano	6
2.3 – Índices de Conforto de Fanger	10
2.3.1 – PMV	10
2.3.2 – PPD	10
2.4 – Variáveis de Entrada	10
2.4.1 – Temperatura do Ar	11
2.4.2 – Temperatura Média Radiante	11
2.4.3 – Humidade Relativa	13
2.4.4 – Velocidade do Ar	14
2.4.5 – Nível de Actividade Física	15
2.4.6 – Nível de Isolamento do Vestuário	16
3 – Modelo Computacional	17
3.1 – Descrição dos Objectivos	17
3.2 – Modelo Iterativo de Cálculo de PMV e PPD	18
3.2.1 – Descrição do Método	18
3.2.2 – Modelos Existentes	20
3.2.3 – Modelo Implementado	21
3.3 – Modelo para Cálculo de Incerteza	22
3.3.1 – Método de Monte Carlo	22
3.3.2 – Incertezas das Variáveis de Entrada	25
3.3.3 – Implementação do Modelo Computacional	27
4 – Apresentação e Discussão de Resultados	28
5 – Conclusões	34
5.1 – Contribuição do Presente Trabalho	34
5.2 – Sugestões para Desenvolvimento Futuro	35
6 – Bibliografia	36
7 – Anexo A: Front Panel – Situação Padrão	38

## **LISTA DE TABELAS E FIGURAS**

Tabela 1 – Limites impostos para as variáveis  $T_a$ ,  $T_r$ ,  $P_a$  e  $V_a$

Tabela 2 – Nível metabólico associado a cada tipo de actividade física

Tabela 3 – Nível de isolamento do vestuário

Tabela 4 – Escala de percepção térmica da ISO 10551:1995

Tabela 5 – Apresentação de resultados – Diferentes valores de  $W$ ,  $I_{cl}$ ,  $T_a$ ,  $T_r$ ,  $P_a$  e  $V_a$

Tabela 6 – Apresentação de resultados – Valores para as incertezas de  $T_a$ ,  $T_r$  e  $P_a$  ‘required’ e ‘desirable’, da norma ISO 7726/98

Tabela 7 – Apresentação de resultados – Diferentes valores de  $inc\ W$ ,  $inc\ I_{cl}$ ,  $inc\ T_a$ ,  $inc\ T_r$ ,  $inc\ P_a$  e  $inc\ V_a$

Tabela 8 – Apresentação de resultados – Situações de calor e frio

Fig 1 – Mecanismos de perdas de calor do organismo

Fig 2 – Relação Peso/Altura/Área

Fig. 3 – Termómetro digital

Fig. 4 – Termómetro de globo

Fig. 5 – Termohigrómetro

Fig. 6 – Anemómetro de baixa velocidade

Fig. 7 – Variação do PPD com o PMV

Fig. 8 – Stanislaw Ulam, Richard Feynman e John von Neumann

Fig. 9 – Fluxograma do Método de Monte Carlo

Fig. 10 – Histograma de PMV para a situação padrão

Fig. 11 – Histograma de PPD para a situação padrão



## LISTA DE ABREVIATURAS

A seguir a cada símbolo, encontra-se a indicação das respectivas dimensões, expressas em termos de massa [M], comprimento [L], tempo [T] e temperatura [ $\theta$ ]. A ausência desta nomenclatura significa que a grandeza é adimensional.

Conv – convecção, [ $MT^{-3}$ ]

$fcl_1$  – relação entre a área vestida e a área nua do corpo, para valores de  $I_{cl}$  inferiores a 0,5Clo

$fcl_2$  – relação entre a área vestida e a área nua do corpo, para valores de  $I_{cl}$  superiores a 0,5Clo

hcconvforç – coeficiente de troca de calor por convecção forçada, [ $MT^{-3}\theta^{-1}$ ]

hcconvnat – coeficiente de troca de calor por convecção natural, [ $MT^{-3}\theta^{-1}$ ]

hcg – coeficiente de convecção do globo negro, [ $MT^{-3}\theta$ ]

$I_{cl}$  – nível de isolamento do vestuário, [ $M^{-1}T^3\theta$ ]

M – taxa de metabolismo, [ $MT^{-3}$ ]

máxhc – máximo valor entre hcconvnat e hcconvforç, [ $MT^{-3}\theta^{-1}$ ]

mínfcl – mínimo valor entre  $fcl_1$  e  $fcl_2$

Pa – humidade relativa, [ $ML^{-1}T^{-2}$ ]

PMV – Predicted Mean Vote

PPD – Predicted Percentage of Dissatisfied

Q – calor líquido dissipado, [ $MT^{-3}$ ]

Rad – radiação, [ $MT^{-3}$ ]

Respcut – respiração cutânea, [ $MT^{-3}$ ]

Resplat – respiração latente, [ $MT^{-3}$ ]

Respsens – respiração sensível, [ $MT^{-3}$ ]

Ta – temperatura do ar, [ $\theta$ ]

tcl – temperatura exterior do vestuário,  $[\theta]$   
tclin – valor que tcl toma no início de cada iteração,  $[\theta]$   
tclout – valor que tcl toma no final de cada iteração,  $[\theta]$   
ti – temperaturas absolutas,  $[\theta]$   
Tr – temperatura média radiante,  $[\theta]$   
Transp – transpiração,  $[MT^{-3}]$   
tsk – temperatura exterior da pele,  $[\theta]$   
Va – velocidade do ar,  $[LT^{-1}]$   
W – trabalho mecânico exterior,  $[MT^{-3}]$   
 $\varepsilon$  – emissividade  
 $\sigma$  – constante de Stephan-Boltzman ( $\sigma=5,67*10^{-8}$ ),  $[MT^{-3}\theta]$

# 1. INTRODUÇÃO

Desde sempre, o Homem vem lutando para que o ambiente circundante permita e favoreça a execução das mais diversas tarefas inerentes ao seu quotidiano. Assim, retirar o máximo partido das condições naturais disponíveis, em benefício de melhores condições de conforto, higiene e segurança, tem sido, ao longo do tempo, uma preocupação constante. É disso exemplo, nomeadamente, a importância que se atribui, hoje, à garantia de satisfação de condições de conforto na concepção e no projecto de espaços habitacionais, de trabalho ou de lazer. A estreita dependência do desempenho humano em relação ao conforto ambiental em que se insere é, de facto, uma realidade desde há muito reconhecida. A par do ruído, da iluminação e da qualidade do ar, o conforto térmico condiciona de forma determinante o grau de bem-estar dos indivíduos. Com o aumento das exigências de conforto, verifica-se um acréscimo do consumo de energia, por enquanto proveniente, sobretudo, da queima de combustíveis de natureza fóssil e, portanto, de disponibilidade limitada no tempo. Surge, então, a grande preocupação de limitar o consumo de energia, em particular no sector da construção. Nos países industrializados, incluindo o nosso, os estudos de avaliação do comportamento térmico de edifícios começam, em consequência, a assumir um papel preponderante.

Tais estudos, que visam analisar e estabelecer as condições necessárias à avaliação e à concepção de um ambiente térmico adequado às actividades e ocupação humanas, baseiam-se, principalmente, em três factores:

- (i) – O grau de satisfação e de bem-estar individual;
- (ii) – A performance humana. As actividades intelectuais, manuais e perceptivas, geralmente, apresentam um melhor desempenho quando realizadas em condições favoráveis de conforto térmico;
- (iii) – A conservação de energia. Vivendo as pessoas, grande parte do tempo, em ambientes controlados artificialmente, a satisfação, à partida, de condições favoráveis de conforto térmico permite minimizar desperdícios inevitavelmente ligados a funções como o aquecimento ou a refrigeração de espaços habitados.

Não sendo possível conceber um ambiente comum em que a totalidade dos seus ocupantes se sinta termicamente confortável, tenta-se criar condições para que isso mesmo se aplique à correspondente maioria. Sendo esta uma área em visível desenvolvimento, têm vindo a surgir *softwares* que permitem determinar facilmente os índices PMV (Predicted Mean Vote) e PPD

(Predicted Percentage of Dissatisfied) relativos ao nível de conforto térmico de um dado ambiente. O PMV corresponde a uma estimativa da votação de um determinado número de pessoas relativamente ao ambiente circundante e o PPD indica o número de indivíduos insatisfeitos com o ambiente em questão. Em ambos os casos, é extremamente importante avaliar o grau de fiabilidade do respectivo cálculo, bem como o peso que cada variável de entrada tem no resultado final.

A escolha do tema do presente trabalho foi feita tendo em conta a necessidade de disponibilização de uma ferramenta de cálculo, prática e de fácil utilização, que permita avaliar o conforto térmico e, também, a incerteza associada a essa mesma avaliação. Assim, o trabalho tem como principal objectivo prever a incerteza com que é efectuada a determinação dos índices PMV e PPD relativos a um determinado ambiente, partindo das condições ambientais envolventes e das condições pessoais dos indivíduos envolvidos.

Numa primeira fase, tendo como base as condições ambientais –  $T_a$  (temperatura ambiente),  $T_r$  (temperatura média radiante),  $P_a$  (humidade relativa) e  $V_a$  (velocidade do ar) – e as variáveis pessoais  $M$  (nível de actividade física) e  $I_{cl}$  (nível de isolamento do vestuário), elabora-se uma folha de cálculo, em *LabView*, que permite obter, através do Método de Fanger, os índices PMV e PPD associados a um dado ensaio experimental. Numa segunda fase, partindo dos resultados de um ensaio, os valores de PMV e PPD resultantes são extrapolados por recurso ao método de Monte Carlo, repetindo  $n$  vezes a experiência, com valores iniciais escolhidos de forma aleatória. Com o leque, assim obtido, de valores associados aos  $n$  ensaios experimentais, e conhecendo a incerteza não só dos instrumentos de medição utilizados, mas também do cálculo das variáveis não mensuráveis, é então possível determinar o desvio padrão e a incerteza associados ao cálculo dos índices PMV e PPD.

Após elaboração de um certo número de ensaios e análise dos resultados obtidos, chegou-se à conclusão de que os níveis de incerteza de PMV são bastante inferiores aos de incerteza de PPD e que há maior variação da incerteza de PPD com a alteração das condições iniciais de cálculo e suas incertezas, relativamente à incerteza de PMV.

Concluiu-se, ainda, que as incertezas dos índices de avaliação de conforto térmico estão mais dependentes da variação das variáveis iniciais do que da variação das suas incertezas.

## 2. CONFORTO TÉRMICO

### 2.1 Conceito

A definição de conforto térmico varia de autor para autor. A norma ISO 7730/05 define-o como “aquela condição de mente na qual é expressa satisfação com o ambiente térmico”. A primeira conclusão a que se chega, partindo desta afirmação, é que este é um conceito altamente abstracto, que varia de indivíduo para indivíduo. Assim, é necessário conjugar inúmeras variáveis de modo a definir o conforto térmico associado a um determinado ambiente. Para o ser humano, estar termicamente confortável significa não sentir calor nem frio, isto é, ter a temperatura do corpo entre os 34°C e os 37°C. A condição básica para que tal se verifique é a de que o sistema termoregulador do organismo se encontre em equilíbrio com o ambiente envolvente.

O controlo do conforto térmico é de extrema importância, uma vez que influencia o bem-estar dos indivíduos e consequentemente a sua saúde e até o seu nível de produtividade no local de trabalho (*Pawel Wargocki*).

Para que haja neutralidade térmica, é necessário que se atinja um balanço entre o calor produzido pelo corpo e o calor perdido por este. Se isto não se verificar, e o calor perdido for superior ao gerado, sentir-se-á frio; se for inferior, a sensação será de calor.

Os estudos de conforto térmico têm vindo a ter um papel cada vez mais importante. Assim, cada vez mais existem normas sobre este tema.

As principais normas e guias de referência são:

*ISO 7730/05 – Ambientes térmicos moderados – Determinação dos índices PMV e PPD e especificações das condições de conforto*

Esta norma propõe um método de determinação da sensação térmica e grau de desconforto dos indivíduos expostos a ambientes térmicos moderados e especifica condições térmicas aceitáveis para o conforto.

ISO 7726/98 – *Ambientes térmicos – Instrumentos e métodos para medições das quantidades físicas*

Esta norma especifica as características mínimas dos instrumentos de medição das variáveis físicas, assim como apresenta métodos de medição desses parâmetros.

ASHRAE Standard 55/2004 – *Ambientes Térmicos – Condições para ocupação humana*

Esta norma especifica condições ambientais aceitáveis para a saúde das pessoas sujeitas a pressões atmosféricas equivalentes a altitudes superiores a 3,00m, em ambientes internos projectados para a ocupação humana por períodos não inferiores a 15 minutos.

ISO 8996/90 – *Ergonomia – Determinação da produção de calor metabólico*

Esta norma especifica métodos para a determinação e medição da taxa de calor metabólico, necessária para a avaliação da regulação de calor humano. Também pode ser usada para outras aplicações, como, por exemplo, a verificação da prática de actividades, o custo energético de actividades específicas ou actividades físicas, bem como o custo total energético das actividades.

ISO 9920/95 – *Ergonomia de ambientes térmicos – Estimativa de isolamento térmico e resistência evaporativa de um traje de roupas*

Esta norma especifica métodos para a estimativa das características térmicas e resistência a perdas de calor, em condições de estado estacionário para um traje de roupa, baseado em valores de vestimentas conhecidas, trajes e tecidos.

Para além das normas referidas, informação relevante sobre este tema encontra-se compilada em: ASHRAE Fundamentals Handbook – *cap. 8 – Thermal Comfort – 1997*

Este guia normativo de aquecimento, refrigeração e ar condicionado apresenta os fundamentos de termoregulação humana e conforto em termos úteis, para a preparação de projectos e aplicações para o conforto dos ocupantes de edificações. Apresenta, de maneira sintetizada, as normas ISO aqui referidas.

Podemos considerar o corpo humano como uma máquina térmica, que dispõe de um mecanismo termoregulador, que controla as variações térmicas do organismo. Uma vez que a temperatura do

corpo deve permanecer praticamente constante (o organismo humano é homotérmico), esse mecanismo termoregulador cria condições para que tal aconteça.

O corpo humano deve possuir condições para desempenhar as actividades que lhe competem:

- Actividades basais, internas, que permitem o bom funcionamento dos nossos órgãos internos;
- Actividades externas, realizadas conscientemente pelo homem através do seu trabalho ou actividade.

Para que um indivíduo esteja em conforto térmico, admitem-se pequenas oscilações na sua temperatura interna, sendo que, em situações mais extremas, se admitem variações um pouco maiores para evitar os perigos de stress térmico.

Os indivíduos apresentam zonas de respostas fisiológicas e comportamentais que dependem das condições a que estão sujeitos e da actividade praticada. Como na maioria dos estudos de conforto térmico, as actividades desempenhadas são do tipo sedentário, o factor humano que mais influencia a determinação das zonas de conforto é o vestuário usado. Podemos, então, considerar duas zonas de conforto, para pessoas vestidas e nuas, dependendo da temperatura do ar:

Para pessoas nuas: Zona de conforto para que se mantenha o equilíbrio térmico situa-se entre os 29°C e os 31°C;

Para pessoas vestidas (com vestuário normal de trabalho, com um isolamento=0,6 Clo): Zona de conforto para que se mantenha o equilíbrio térmico situa-se entre os 23°C e os 27°C.

Todas as pessoas procuram estar num ambiente termicamente neutro, estando a sua temperatura corporal entre os 34°C e os 37°C. No entanto, isto nem sempre se verifica.

As consequências de um aumento excessivo da temperatura corporal podem levar a:

- Vaso-dilatação sanguínea: aumento das trocas de calor;
- Activação (abertura) das glândulas sudoríparas: aumento do intercâmbio de calor por troca do estado de suor de líquido a vapor;
- Aumento da circulação sanguínea periférica (até 2,6l/min/m<sup>2</sup>);
- Troca eléctrica de 'suor'. A perda de NaCl pode chegar a 15g/litro.

Por outro lado, uma diminuição exagerada da temperatura corporal provoca:

- Vaso-constricção sanguínea: diminuição da cedência de calor ao exterior;
- Desactivação (fecho) das glândulas sudoríparas;
- Diminuição da circulação sanguínea periférica;

- Tritona: produção de calor (transformação de energia química em energia mecânica e térmica);
- Autofagia das gorduras armazenadas: transformação química de lípidos em glicídios de metabolização directa;
- Encogimento: apresentação da mínima superfície de pele em contacto com o exterior.

Contudo, como já se comentou anteriormente, estar em neutralidade térmica não é suficiente para que se esteja em conforto térmico. É necessário, ainda, que se verifiquem as seguintes condições:

- Possuir a temperatura da pele e a taxa de secreção de suor dentro dos limites aceitáveis de acordo com a actividade praticada;
- Não se estar sujeito a nenhum tipo de desconforto térmico localizado.

## 2.2 Balanço Térmico do Corpo Humano

O modelo usado na norma ISO 7730/05 utiliza o estado estacionário, ou permanente, desenvolvido por Fanger, o qual assume que o corpo, num dado ambiente, se encontra em estado de equilíbrio, não ocorrendo acumulação de calor no seu interior.

A energia metabólica total,  $M$ , produzida no corpo é distribuída numa parcela relativa ao trabalho dispendido por este, e numa outra relacionada com o calor por ele dissipado. Este último item é composto por trocas de calor entre o corpo humano e o ambiente envolvente sob a forma de respiração cutânea (Respcut), transpiração, (Transp), respiração latente (Resplat), respiração sensível (Respsens), radiação (Rad) e convecção (Conv).

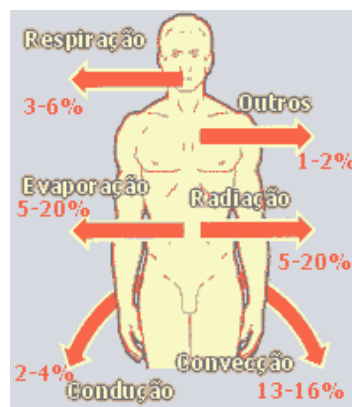


Fig 1: Mecanismos de perdas de calor do organismo



A temperatura do ambiente é importante uma vez que determina a velocidade com que o calor do corpo pode ser transferido para o ambiente e, assim, a facilidade com que o corpo pode regular e manter uma temperatura adequada. Uma vez que os mecanismos de termoregulação do organismo têm como finalidade essencial a manutenção de uma temperatura interna constante, é evidente que tem de existir um equilíbrio entre a quantidade de calor gerado no corpo e a sua transmissão ao meio ambiente. O conforto térmico de um indivíduo depende directamente de como ocorrem as trocas de calor com o ambiente.

A equação que se segue descreve o Balanço Térmico do corpo humano:

$$M - (W + Q) = 0 \quad (1)$$

em que  $M$  é a energia metabólica total [ $\text{W/m}^2$ ] e  $W$  o trabalho mecânico exterior [ $\text{W/m}^2$ ].

$Q$  representa o calor líquido dissipado e é composto por:

$$Q = Re\ spcut + Transp + Re\ splat + Re\ spsens + Rad + Conv \quad [\text{W/m}^2] \quad (2)$$

Os termos das duas equações anteriores são dados em energia por unidade de área, e referem-se à área da superfície do corpo nu. Uma expressão convencional dessa área é dada pela expressão da área de DuBois ( $A_D$ ):

$$A_D = 0,202 * m^{0,425} * l^{0,725} \quad (3),$$

onde:

$A_D$  = área superficial do corpo, ou área de DuBois [ $\text{m}^2$ ];

$m$  = massa do corpo [ $\text{Kg}$ ];

$l$  = altura do corpo [ $\text{m}$ ].

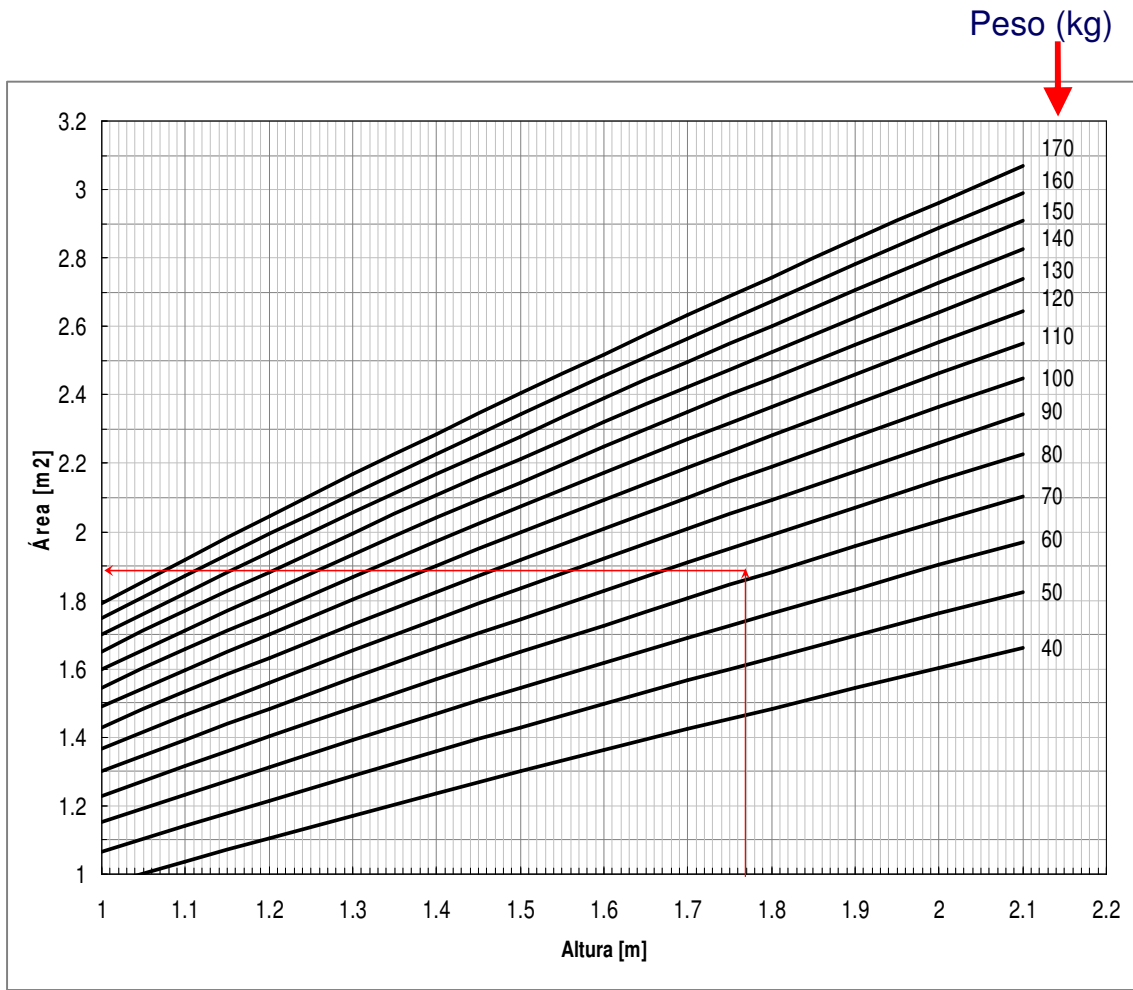


Fig 2: Relação Peso/Altura/Área

As perdas de calor podem ser expressas pelas seguintes equações:

$$Re_{spcut} = (3,05 * 10^{-3}) * (5733 - 6,99 * (M - W) - Pa) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (4)$$

$$Transp = 0,42 * ((M - W) - 58,15) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (5)$$

$$Re_{splat} = 1,7 * 10^{-5} * M * (5867 - Pa) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (6)$$

$$Re_{spsens} = 0,0014 * M * (34 - Ta) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (7)$$

$$Rad = 3,96 * 10^{-8} * mínfcl * (tcl + 273)^4 - (Tr + 273)^4 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (8)$$

$$Conv = tcl * (máxhc - Ta) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (9)$$

As variáveis Pa, Ta e Tr são, respectivamente:

Pa – humidade relativa (Pascal);

Ta – temperatura do ar (°C);

Tr – temperatura média radiante (°C).

tcl é a temperatura exterior do vestuário, em °C.

mínfcl toma o menor valor de entre:

- fcl<sub>1</sub>, para valores de Icl inferiores a 0,5Clo

- fcl<sub>2</sub>, para valores de Icl superiores a 0,5Clo

$$fcl1 = 1 + 1,29 * Icl \quad (10)$$

$$fcl2 = 1,05 + 0,645 * Icl \quad (11)$$

Icl é o nível de isolamento do vestuário.

máxhc representa o maior dos seguintes valores:

- Coeficiente de troca de calor por convecção natural (hcconvnat), em (W/m<sup>2</sup>°C)

- Coeficiente de troca de calor por convecção forçada (hcconvforç), em (W/m<sup>2</sup>°C).

$$hcconvnat = 2,38 * (tcl - Ta)^{0,25} \quad (12)$$

$$hcconvforç = 12,1 * Va^{0,5} \quad (13)$$

Va é a velocidade do ar, expressa em m/s.

## **2.3 Índices de Conforto de Fanger**

### **2.3.1 PMV**

Ole Fanger (1970) desenvolveu um método que tem por base a determinação do índice PMV (Predicted Mean Vote), partindo de uma equação de balanço térmico para o corpo humano. Este índice corresponde a uma previsão da votação de um determinado número de pessoas relativamente a um dado ambiente térmico. O Método de Fanger relaciona a diferença entre o calor produzido e o calor libertado pelo corpo humano com a votação média previsível de um painel de avaliação numa escala de conforto.

Segundo Fanger, a sensação de neutralidade térmica é a condição na qual o indivíduo não deseje nem mais calor nem mais frio em relação ao ambiente térmico em que se encontra. O corpo humano está em neutralidade térmica quando todo o calor gerado pelo organismo através do metabolismo é trocado em igual proporção com o ambiente em redor.

### **2.3.2 PPD**

Após determinação do PMV, o índice PPD prevê o número de pessoas insatisfeitas com o ambiente térmico. Aparece sob a forma de percentagem e corresponde às pessoas que votam muito quente ou muito frio, no PMV.

## **2.4 Variáveis de Entrada**

Em termos práticos, para a aplicação do Método de Fanger e consequente determinação do PMV, é necessário conhecer as seguintes grandezas:

1. Temperatura do ar,  $T_a$  (°C)
2. Temperatura média radiante,  $T_r$  (°C)
3. Humidade relativa,  $P_a$  (Pa)
4. Velocidade do ar,  $V_a$  (m/s)
5. Nível de actividade física,  $M$  (W/m<sup>2</sup>)
6. Nível de isolamento do vestuário,  $I_{cl}$  (m<sup>2</sup>°C/W)

As quatro primeiras grandezas são grandezas físicas (estão relacionadas com as condições ambientais) e, portanto, mensuráveis; as duas últimas são estimáveis. A influência destes parâmetros na perda de energia não é igual.

#### **2.4.1 Temperatura do ar**

Considera-se temperatura do ar,  $T_a$ , a temperatura que circunda o corpo humano e pode ser facilmente medida com um termómetro. Esta é uma variável de grande importância na análise das trocas de calor por convecção. Para a sua definição, usa-se um termómetro.



Fig. 3: Termómetro digital

#### **2.4.2 Temperatura média radiante**

A temperatura média radiante,  $T_r$ , é a temperatura de um espaço fechado uniforme imaginário em que a transferência de calor radiante a partir do corpo humano é igual à transferência de calor radiante deste no espaço em questão. Esta grandeza pode ser medida com um termómetro de globo, que consiste num termómetro colocado no centro de um corpo cilíndrico com 15cm de diâmetro, pintado interna e externamente a preto fosco.

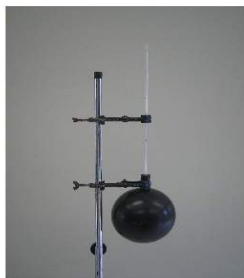


Fig. 4: Termómetro de globo

A temperatura do globo resulta do balanço térmico relativo ao globo negro, considerando que o fluxo de calor por convecção entre o globo e o ar envolvente e o fluxo de calor por radiação entre o globo e as superfícies envolventes se anulam mutuamente, em regime permanente.

Este balanço térmico é traduzido por:

$$\varepsilon * \sigma * (\overline{Tr}^4 - tg^4) + hcg * (Ta - tg) = 0 \quad (14)$$

em que:

$\sigma$  - constante de Stephan-Boltzman ( $\sigma=5,67*10^{-8}$ )[Wm<sup>-2</sup>°K<sup>-4</sup>];

$\varepsilon$  - emissividade (adimensional);

$t_i$  – temperaturas absolutas [°K];

$hcg$  – coeficiente de convecção do globo negro [Wm<sup>-2</sup>°K].

Assim, o valor da temperatura média radiante é calculado segundo:

$$\overline{tr} = \sqrt[4]{(tg + 273)^4 + \frac{hcg * (Ta - tg)}{\varepsilon - \sigma}} - 273 \text{ [°C]} \quad (15)$$

É, ainda, possível determinar esta temperatura, sabendo a temperatura plana radiante em 6 direcções diferentes e os factores de área de uma pessoa projectados nessas mesmas direcções.

Os factores de área têm valores distintos para situações em que o indivíduo esteja sentado ou em pé. Estes valores encontram-se na norma ISO 7726, para as seguintes direcções: cima (up), baixo (down), esquerda (left), direita (right), frente (front) e costas (back).

A temperatura média radiante pode calcular-se usando as seguintes expressões:

$$\overline{Tr} = \frac{0,18 * (tpr[up] + tpr[down]) + 0,22 * (tpr[right] + tpr[left]) + 0,30 * (tpr[front] + tpr[back])}{2 * (0,18 + 0,22 + 0,30)}$$

(16)

e

$$\overline{Tr} = \frac{0,08 * (tpr[up] + tpr[down]) + 0,23 * (tpr[right] + tpr[left]) + 0,35 * (tpr[front] + tpr[back])}{2 * (0,08 + 0,23 + 0,35)}$$

(17)

A primeira expressão corresponde ao caso em que a pessoa se encontra sentada, e a segunda, ao caso em que está de pé.

$\overline{Tr}$  é a temperatura média radiante e  $tpr$  é a temperatura plana radiante.

Quando a pessoa não se encontra imobilizada, usa-se uma média para os factores de área relativos às direcções direita/esquerda e frente/costas.

Assim, temos as seguintes equações, respeitantes respectivamente às situações sentado e em pé:

$$\overline{Tr} = 0,13 * (tpr[up] + tpr[down]) + 0,185 * (tpr[right] + tpr[left] + tpr[front] + tpr[back]) \quad (18)$$

$$\overline{Tr} = 0,13 * (tpr[up] + tpr[down]) + 0,185 * (tpr[right] + tpr[left] + tpr[front] + tpr[back]) \quad (19)$$

### **2.4.3 Humidade relativa**

A humidade relativa,  $Pa$ , representa a quantidade de vapor de água contida no ar, relativamente à quantidade máxima que este poderia conter, a uma dada temperatura e pressão. Este parâmetro é tido em conta para se analisar as trocas por evaporação entre o homem e o ambiente. É, geralmente, expressa em termos de pressão parcial de vapor de água. Pode ser medida com um higrómetro, ou com um termohigrómetro.



Fig. 5: Termohigrómetro

#### **2.4.4 Velocidade do ar**

A velocidade do ar,  $V_a$ , é definida pela sua intensidade e direcção (é uma grandeza vectorial). Um fluxo de ar pode ser descrito pela sua velocidade média,  $V_a$ , sendo esta medida com um anemómetro. Um aumento da velocidade do ar sobre um indivíduo causa um aumento das perdas de calor, principalmente pelo aumento do coeficiente de convecção.

A norma ISO 7726/98 prevê limites entre os quais devem estar contidas as grandezas intervenientes na avaliação do conforto térmico. A tabela que se segue resume os limites impostos para as quatro grandezas referidas.



Fig 6: Anemómetro de baixa velocidade

Quantidade	Símbolo	Intervalo de valores
Temperatura do ar	$T_a$	10°C a 40°C
Temperatura média radiante	$T_r$	10°C a 40°C
Humidade relativa	$P_a$	500Pa a 3000Pa
Velocidade do ar	$V_a$	0,05m/s a 1m/s

Tabela 1: Limites impostos para as variáveis  $T_a$ ,  $T_r$ ,  $P_a$  e  $V_a$



#### **2.4.5 Nível de actividade física**

O nível de actividade física, M, está intimamente relacionado com o metabolismo de cada indivíduo. A quantidade de energia libertada graças ao metabolismo depende da quantidade de actividade muscular. O nosso metabolismo atinge o seu valor mínimo quando dormimos, e chega ao valor máximo quando praticamos actividades desportivas exigentes. Pode ser medido em Met (1Met=58,15W/m<sup>2</sup> de superfície corporal). Estima-se que o nível de actividade física de um indivíduo, no seu dia-a-dia, se encontre entre os 0,8Met e os 4Met, ou seja, entre os 46W/m<sup>2</sup> e os 232W/m<sup>2</sup>, podendo, em situações extremas, ultrapassar estes valores.

<b>Actividade</b>	<b>Nível metabólico</b>	
	<b>Met</b>	<b>W/m<sup>2</sup></b>
Deitado	0,8	46,52
Sentado, a descansar	1	58,15
Sentado, actividade sedentária	1,2	69,78
Condução de veículo	1,4	81,41
Actividade leve em pé	1,6	93,04
Caminhada lenta, 2Km/h	1,9	110,49
Trabalho doméstico	2,5	145,38
Caminhada rápida, 5Km/h	3,4	197,71
Agricultor com enxada	6,5	377,98
Lenhador com machado	8,6	500,09
Corrida, 15Km/h	9,5	552,43

Tabela 2: Nível metabólico associado a cada tipo de actividade física

#### **2.4.6 Nível de isolamento do vestuário**

O nível de isolamento do vestuário,  $I_{cl}$ , mede-se em Clo ou  $m^2C/W$ , sendo que  $1Clo=0,155m^2C/W$ . Esta grandeza varia, usualmente, entre os 0Clo e os 2Clo, ou seja, entre  $0m^2C/W$  e  $0,310m^2C/W$ . A determinação de  $I_{cl}$  foi feita através de medições em manequins aquecidos (Fanger, 1970), que se encontram em tabelas das normas ISO 7730/05.

	<b>Nível de isolamento do vestuário</b>	
<b>Vestuário</b>	<b>Clo</b>	<b><math>M^2C/W</math></b>
Casaco	0,35	0,054
Sobretudo	0,70	0,109
Calças	0,25	0,039
Saia	0,18	0,028
Mini-saia	0,10	0,016
Camisa	0,25	0,039
Sapatos leves	0,02	0,003
Botas	0,10	0,016

Tabela 3: Nível de isolamento do vestuário

Conhecendo as peças de roupa associadas a um indivíduo, e os valores de isolamento de cada peça, o nível de isolamento total do vestuário calcula-se somando estes últimos valores. No caso de ser necessário utilizar valores exactos, recorre-se a manequins aquecidos.

É importante, ainda, ter em conta que certos tipos de envolventes (por exemplo, assentos de carros) podem influenciar esta grandeza. Além de agir como isolamento contra a transferência de calor, a roupa influencia a perda de calor por evaporação. A força deste efeito depende da natureza da roupa e da sua permeabilidade à humidade.

A fim de definir o conforto térmico relativo a um dado ambiente, é usual recorrer-se a 3 índices que facilitam bastante esta tarefa. São eles a temperatura operativa,  $t_o$ , a temperatura equivalente,  $t_{eq}$ , e a temperatura efectiva, ET. Estes índices são calculados para ambientes imaginários cujas perdas de calor são iguais às perdas de calor do ambiente em questão.

A temperatura operativa é a temperatura uniforme de um compartimento preto imaginário, no qual o ocupante troca as mesmas quantidades de calor, por radiação e convecção, que no ambiente considerado.

A temperatura equivalente é a temperatura uniforme de um compartimento imaginário, no qual a velocidade do ar é nula. Aqui, o ocupante troca a mesma quantidade de calor sensível que no ambiente considerado.

A temperatura efectiva é a temperatura uniforme de um compartimento imaginário cuja humidade relativa é de 50%. O ocupante troca a mesma quantidade de calor, por radiação, convecção e evaporação, que no ambiente considerado.

Assim, podemos escolher uma das seguintes opções:

- Medir  $T_a$ ,  $P_a$  e  $V_a$ , e calcular  $T_r$ ;
- Medir  $P_a$ ,  $V_a$  e  $t_o$  (que substitui  $T_a$  e  $T_r$ );
- Medir  $P_a$  e  $t_{eq}$  (que substitui  $T_a$ ,  $T_r$  e  $V_a$ );
- Medir  $V_a$  e calcular ET (que substitui  $T_a$ ,  $T_r$  e  $P_a$ ).

### **3. MODELO COMPUTACIONAL**

#### **3.1 Descrição dos Objectivos**

Com este trabalho, pretende-se avaliar a influência de vários factores no cálculo da incerteza associada à determinação dos índices PMV e PPD. De entre estes factores, salientam-se as incertezas associadas aos aparelhos de medição e cálculo das variáveis de entrada.

Tendo por base um modelo de cálculo que parte da determinação do PMV e PPD, segundo o Método de Fanger, e extrapola o número de ensaios, através do Método de Monte Carlo, pretende-se chegar ao desvio padrão associado aos resultados obtidos e, assim, à incerteza expandida.

Fazendo variar as variáveis de entrada, bem como as suas incertezas, pretende-se determinar a influência de cada uma na incerteza final.

## 3.2 Modelo Iterativo de Cálculo de PMV e PPD

### 3.2.1 Descrição do Método

Partindo de uma equação de balanço térmico para o corpo humano, Fanger apresenta o índice PMV, que corresponde a uma previsão da votação de um determinado número de pessoas relativamente a um dado ambiente térmico.

A escala de conforto térmico usada por Fanger representa o estado psicológico das pessoas em relação ao ambiente térmico em que se encontram e vai de -3 (muito frio) a +3 (muito quente) – Escala de 7 pontos de Gagge.

+3	Muito quente
+2	Quente
+1	Levemente quente
0	Neutro
-1	Levemente frio
-2	Frio
-3	Muito frio

Tabela 4: Escala de percepção térmica da ISO 10551:1995

Numa divisão contendo várias pessoas, cada uma usando um certo tipo de vestuário, e praticando um dado tipo de actividade, é difícil conceber um ambiente agradável a todos. Existem, no entanto, maneiras acessíveis a cada indivíduo de se adaptar a um ambiente, como sendo vestir ou despir peças de vestuário.

Segundo Fanger, calcula-se o PMV recorrendo à seguinte equação:

$$PMV = ((0,303 * e^{(-0,0306 * M)}) + 0,028) * ((M - W) - Re_{s\text{pcut}} - Transp - Re_{s\text{plat}} - Re_{s\text{pens}} - Rad - Conv) \quad (20)$$

Apesar de todas as suas vantagens, o Método de Fanger apresenta uma dificuldade que se prende com o facto de o termo  $t_{cl}$  (temperatura exterior do vestuário) não ser conhecido. Assim, a partir de uma equação que traduz o balanço térmico para a camada de vestuário, e através de um método iterativo, é-nos possível conhecer o seu valor.

O fluxo de calor transmitido por condução através do vestuário, desde a camada interior, à temperatura da pele, até à camada exterior, é igual à soma das trocas de calor por convecção e radiação para o ambiente circundante, em regime permanente.

Este balanço é expresso pela seguinte equação:

$$(t_{sk} - t_{cl}) / l_{cl} = 3,96 * 10^{-8} * f_{cl} * [(t_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] - f_{cl} * m_{áxhc} * (t_{cl} - T_a) \quad (21)$$

Isolando o termo  $t_{cl}$ , temos:

$$t_{cl} = t_{sk} - l_{cl} * 3,96 * 10^{-8} * f_{cl} * [(t_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] - l_{cl} * f_{cl} * m_{áxhc} * (t_{cl} - T_a) \quad (22),$$

onde  $t_{sk}$  é o valor da temperatura exterior da pele e se calcula por:

$$t_{sk} = 35,7 - 0,028 * (M - W) \quad (23)$$

Introduzindo um valor inicial de  $t_{cl} - t_{clin}$  - (entre 10 e 40°C), e após um determinado número de iterações, chega-se ao valor final de  $t_{cl} - t_{clout}$ . O processo iterativo cessa quando o módulo da diferença entre  $t_{clin}$  e  $t_{clout}$  for inferior a 0,001.

Há, ainda, uma outra maneira de calcular o índice PMV: utilizar as tabelas constantes do anexo C da norma, ISO 7730/05 em função de diferentes combinações de actividade, vestuário, velocidade do ar e temperatura operativa.

Devido às diferenças entre os indivíduos, é impossível conceber um ambiente que seja considerado termicamente agradável por todos, havendo sempre uma percentagem de pessoas insatisfeitas.

O PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) dá a conhecer o número de pessoas insatisfeitas com um certo ambiente térmico. Este índice está contemplado na ISO 7730/05.

A determinação do PPD a partir do PMV obtém-se através da seguinte equação:

$$PPD = 100 - 95e^{-(0,03353*PMV^4 + 0,2179*PMV^2)} \quad (24)$$

O PPD prevê o número de pessoas insatisfeitas com o ambiente térmico (pessoas que votam muito quente ou muito frio, no PMV); o resto das pessoas considera-o ligeiramente quente, neutro, ou ligeiramente frio.

Fanger anuncia que a variação do PPD com o PMV corresponde a uma curva semelhante a uma curva de Gauss Invertida.

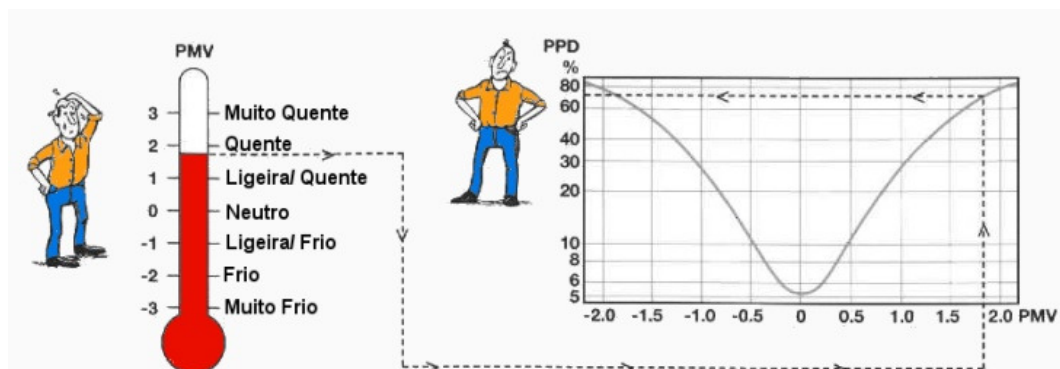


Fig. 7: Variação do PPD com o PMV

Segundo a curva de variação do PPD com o PMV, a zona de conforto térmico é definida pelos valores de PMV contidos entre -0,5 e 0,5, ou seja, a percentagem de pessoas insatisfeitas (PPD) não deve ser superior a 10%. Pela análise desta curva, observa-se, ainda, que a percentagem de pessoas insatisfeitas é de 5%, para PMV=0, isto é, para ambientes definidos pela generalidade das pessoas como termicamente neutros.

### **3.2.2 Modelos Existentes**

Existe uma muito vasta literatura acerca dos temas abordados neste relatório. No entanto, é de salientar dois estudos que servem de modelo a este trabalho. São eles:

- «Aplicações Computacionais para Avaliação do Conforto Térmico», de Manuel Carlos Gameiro da Silva (2004), que contém uma folha de cálculo onde é possível avaliar os níveis de conforto térmico de um dado ambiente, observando-se, ainda, a evolução dos itens intervenientes no balanço térmico do corpo humano;
- «Evaluation and Visualisation of Perceived Thermal Conditions», de Hakan O. Nilsson (2004), que estuda o conforto térmico e desconforto localizado, recorrendo a medições feitas em manequins.

### **3.2.3 Modelo Implementado**

Foi criado um software em Labview que permite determinar os índices PMV e PPD, conhecendo as variáveis iniciais necessárias ao cálculo ( $T_a$ ,  $T_r$ ,  $V_a$ ,  $P_a$ ,  $M$ ,  $W$  e  $I_{cl}$ ).

Estas variáveis são introduzidas pelo utilizador, tendo este, no entanto, que respeitar os limites exigidos pela norma ISO 7730/05, com vista à convergência do método. Depois de escolhidas estas variáveis, o utilizador deverá, ainda, seleccionar um valor inicial para a variável  $t_{cl}$  ( $t_{clin}$ ). Uma vez que este valor é, inicialmente, desconhecido, segue-se um método iterativo que tem como condição de paragem:

$$|t_{clin} - t_{clout}| \leq 0,001 \quad (25)$$

Quando isto se verifica, o método pára, e são dados a conhecer ao utilizador os valores de PMV e de PPD relativos à última iteração.

Até se dar esta condição, a variável  $t_{clin}$  da iteração  $i$  toma o valor de  $t_{clout}$  da iteração anterior.

As equações de cálculo estão compiladas, por ordem de utilização, num ‘formula node’, que permite chegar às variáveis de saída (output variables), introduzindo as variáveis de entrada (input variables) necessárias ao cálculo.

A parte iterativa está contemplada num ‘while loop’, que executa inúmeras vezes a mesma tarefa (neste caso, as equações inseridas no ‘formula node’, por sua vez inserido no ‘while loop’). O

valor inicial de  $t_{lin}$  é introduzido pelo utilizador, sendo os restantes determinados segundo:  $t_{lin_i} = t_{clout_{i-1}}$ . Para tal, recorreu-se ao ‘shift register’. O método cessa quando se verifica a condição de paragem. Nessa altura, os valores de PMV e PPD passam a ser visíveis pelo utilizador.

### 3.3 Modelo para Cálculo de Incerteza

#### 3.3.1 Método de Monte Carlo

Em 1946, enquanto recuperava de uma encefalite, o matemático Stanislaw Ulam ocupava o seu tempo a jogar paciências. Começou por calcular as probabilidades no jogo usando análise combinatória, mas rapidamente se apercebeu de que seria bastante mais prático realizar um elevado número de jogadas e contar quantas vezes ocorria cada resultado.



Fig. 8: Stanislaw Ulam, Richard Feynman e John von Neumann

Ulam estava a par das desvantagens da utilização de técnicas de amostragem estatística (lentidão e pouca fiabilidade de resultados). Entretanto, surgiu o ENIAC, o primeiro computador electrónico, desenvolvido durante a segunda guerra mundial. A sua versatilidade e rapidez levaram Ulam a usá-lo para solucionar o problema da difusão de neutrões em materiais sujeitos a fissuras nucleares. O Método de Monte Carlo (assim denominado em homenagem ao carácter aleatório proveniente dos jogos de roleta de Monte Carlo, no Principado de Mónaco) usa



amostragens estatísticas para resolver de maneira aproximada problemas complexos, simulando a realização de uma grande quantidade de ensaios experimentais. Estes ensaios não são, de facto, realizados, apenas o são teoricamente. Sendo cada ensaio experimental composto por várias etapas, e conhecendo a probabilidade de cada resultado ocorrer em cada uma dessas etapas, pode-se conhecer os resultados finais após as diversas etapas que compõe um ensaio, após inúmeros ensaios. A precisão do resultado final depende, em geral, do número de tentativas. Esse equilíbrio entre a precisão do resultado e o tempo de computação é uma característica extremamente útil do Método de Monte Carlo. Se queremos somente uma solução aproximada, então este método pode ser bastante rápido. Um dos interesses deste método é diminuir a necessidade de análise. Em contrapartida, os resultados obtidos são muito menos precisos do que os que são obtidos por um método directo, uma vez que se trata apenas de uma estimativa estatística. Este método torna-se extremamente útil no caso de o problema em estudo ser complexo, ou de a solução depender de inúmeras outras soluções.

A figura que se segue mostra um fluxograma que indica os passos necessários para executar uma análise da incerteza pelo Método de Monte Carlo.

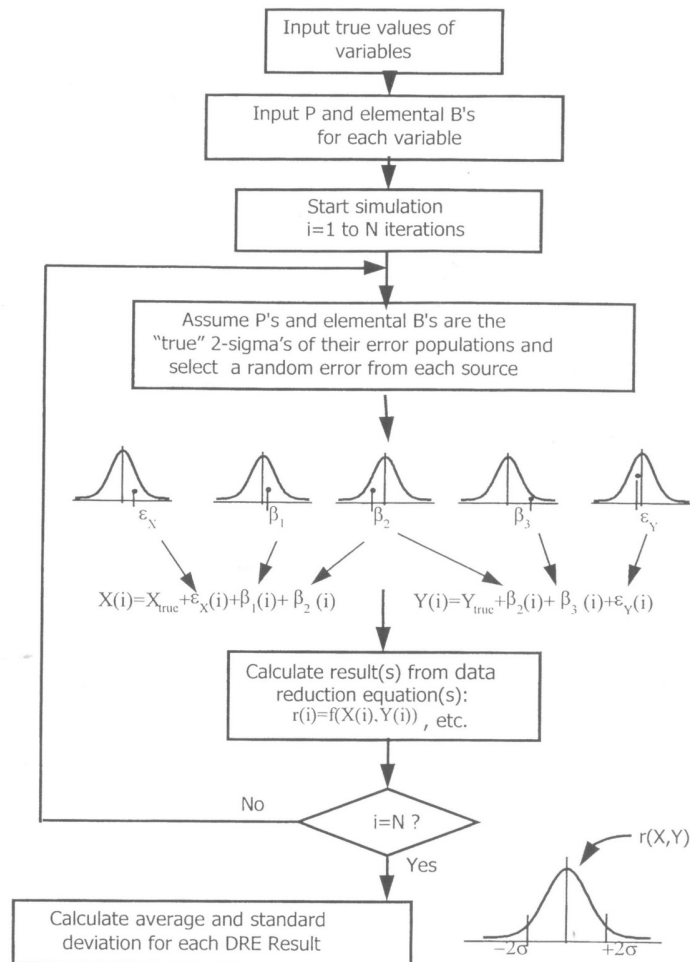


Fig. 9: Fluxograma do Método de Monte Carlo

Em primeiro lugar, introduzem-se os valores de cada variável inicial. Em seguida, indicam-se as incertezas relativas a cada input (variável de entrada) e o número de simulações pretendidas. Se o nível de confiança for de 95%, estas incertezas representam 2 vezes o desvio padrão. Explicita-se o número de simulações pretendidas,  $n$ , procedendo-se à execução dos cálculos em causa  $n$  vezes. Por último, é calculada a média e o desvio padrão dos valores obtidos.

A simplicidade dos seus algoritmos e eficiência na obtenção de resultados em condições muito difíceis justificam a utilização do Método de Monte Carlo em diversas áreas do conhecimento, como economia, física, química, medicina, entre outras.

Embora as determinações acima sejam práticas e muito utilizadas, formalmente, o Método de Monte Carlo está frequentemente associado à solução de integrais. O método é utilizado na solução de equações diferenciais pela conversão destas em equações integrais. A associação do Método de Monte Carlo com integrais é feita de maneira também muito simples e intuitiva, e a sua vantagem está na possibilidade de reduzir sistemas com grande número de dimensões através da determinação de uma média.

Uma importante contribuição no uso do Método de Monte Carlo ocorreu aproximadamente no início da década de 80 do século passado, quando esta metodologia passou a ser utilizada na solução da Equação de Schrödinger para o estudo de propriedades electrónicas e vibratórias de átomos e moléculas. Esta aplicação específica passou a ser denominada ‘Monte Carlo Quântico’.

### **3.3.2 Incerteza das Variáveis de Entrada**

Quando se expressa quer o resultado de medição de uma grandeza física, quer o resultado de um cálculo, é necessário que se indique quantitativamente a qualidade do resultado, de forma tal que aqueles que o utilizam possam avaliar a sua fiabilidade.

Pode dizer-se que o conceito incerteza é relativamente novo na história da medição, enquanto erro e análise de erro são já uma prática da ciência da medição ou metrologia.

A incerteza, segundo a Directiva Comunitária 2007/589/CE, é definida como ‘um parâmetro associado ao resultado da determinação de uma quantidade, que caracteriza a dispersão de valores que poderiam, razoavelmente, ser atribuídos a essa determinada quantidade, expressos em percentagem, e que descrevem um intervalo de confiança próximo do valor médio compreendendo 95 % dos valores inferidos’.

Na linguagem comum, a palavra incerteza está associada ao conceito geral de dúvida. No entanto, incerteza de uma medição ou de um cálculo não implica que se coloquem dúvidas sobre a validade dessa mesma medição ou cálculo; antes pelo contrário, o conhecimento da incerteza implica confiança acrescida na validade do resultado.

Para chegar à incerteza de um cálculo, é necessário conhecer, de antemão, o desvio padrão desse cálculo.

Desvio padrão é a medida mais comum de dispersão estatística e corresponde à raiz quadrada da variância, sendo a variância de um conjunto de dados a média aritmética dos quadrados dos desvios destes dados em relação à sua média aritmética.

O termo desvio padrão foi introduzido na estatística por Karl Pearson, em 1894, no seu livro *‘Sobre a dissertação das curvas de frequência assimétricas’*.

Podemos fazer a distinção entre desvio padrão do total de uma população ou de uma variável aleatória,  $\sigma$ , e desvio padrão de um subconjunto em amostra,  $s$ .

O desvio padrão amostral de uma variável aleatória pode calcular-se da seguinte forma:

- Para cada valor  $x_i$ , calcula-se a diferença  $x_i - \bar{x}$ , entre  $x_i$  e o valor médio  $\bar{x}$ ;
- Somam-se os quadrados das diferenças;
- Divide-se este resultado por (número de valores-1),  $N-1$ . Chega-se, assim, à variância  $s^2$ .
- O desvio padrão,  $s$ , é a raiz quadrada da variância.

Incerteza padrão combinada ( $u_c$ ) é um desvio padrão estimado, igual à raiz quadrada positiva da variância, obtida pela combinação de todas os componentes da incerteza através da lei de propagação da incerteza.

Incerteza padrão expandida ( $U$ ) é a incerteza expandida dá um intervalo dentro do qual se crê encontrar-se o valor do esperado, com um maior grau de confiança.  $U$  é obtido pela multiplicação da incerteza padrão combinada,  $u_c$ , por um factor de expansão  $k$ . A escolha do factor  $k$  é baseada no grau de confiança desejado. Para um grau de confiança de aproximadamente 95%,  $k$  é 2. Este é o valor usado neste trabalho.

Neste trabalho, a incerteza do cálculo foi estimada com base na reprodutibilidade do método. No caso das variáveis mensuráveis,  $T_a$ ,  $T_r$ ,  $V_a$ ,  $P_a$ , partiu-se da incerteza associada aos instrumentos de medição (norma ISO 7726/98); quanto às variáveis de entrada  $M$  e  $I_{cl}$ , o valor considerado corresponde à incerteza do respectivo cálculo.

### **3.3.3 Implementação de Modelo Computacional**

Partindo do software criado anteriormente (explicado no ponto 3.2.3), elaborou-se uma nova ferramenta de cálculo na qual se aplicou a componente aleatória do projecto.

Tendo por base o Método de Monte Carlo, simulou-se a realização de um dado número  $n$  de ensaios experimentais, ou seja, partiu-se de  $n$  conjuntos de variáveis iniciais, tendo-se chegado a  $n$  valores de PMV e PPD.

Foi criado um 'for loop', onde toda a parte de cálculo está inserida. Este ícon permite realizar uma tarefa um número de vezes pré-determinado pelo utilizador (número de ciclos).

Inicialmente, fez-se uma atribuição aleatória de novos valores (entre 0 e 1) às variáveis iniciais temperatura ambiente, temperatura média radiante, humidade relativa e velocidade do ar aos quais se multiplicou o número 10000 (de forma a aumentar a amplitude de resultados). Dado que se tratam de variáveis mensuráveis ( $T_a$ ,  $T_r$ ,  $P_a$  e  $V_a$ ), estes números finais foram combinados com um desvio padrão igual à incerteza associada ao instrumento de medição utilizado (inserida pelo utilizador), dividida por 2 (factor de expansão,  $k$ ). No caso das variáveis  $M$ , nível de actividade física e  $I_{cl}$ , nível de isolamento do vestuário, foi-lhes atribuídos alguns valores plausíveis, correspondentes a, respectivamente, diferentes níveis de actividade e de vestuário. Tomou-se o valor 0 para  $W$  (trabalho mecânico exterior), uma vez que se verifica ser este o valor a que corresponde, na maior parte dos casos.

O valor de  $t_{clin}$  não provém de uma escolha aleatória, uma vez que, estando englobado numa parte iterativa, não há vantagem em que tome um valor diferente para cada ciclo.

Após realização do cálculo previsto no ponto 3.2.3, obtemos um número de valores para PMV e PPD igual ao número de conjuntos de variáveis de entrada, ou seja, igual ao número de ciclos.

Com base nestes valores de PMV e PPD, o software calcula a média e o desvio padrão associados a cada um deles. Conhecendo o desvio padrão, e usando um factor de expansão,  $k$ , igual a 2 (para um grau de confiança de 95%), ou seja, multiplicando-o por 2, chegamos à incerteza expandida. A evolução dos valores de PMV e PPD obtidos é visível em dois histogramas.

## 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Após elaboração do software, simularam-se alguns ensaios, fazendo variar as variáveis de entrada, de maneira a poder concluir acerca da sua influência nos valores de PMV, PPD e respectivas incertezas expandidas.

Observaram-se os resultados obtidos para 5.000, 10.000 e 50.000 ciclos. Não havendo uma diferença significativa entre eles, optou-se por apresentar e discutir os resultados obtidos com 50.000 ciclos.

Partiu-se de uma situação padrão, de conforto, em que as incertezas associadas às variáveis mensuráveis são as preconizadas pela norma ISO 7726/98 (exceptuando a incerteza de  $V_a$ , para a qual se escolheu um valor ligeiramente inferior, de maneira a evitar que a ordem e grandeza seja a mesma que a variável em si). No caso das incertezas de  $M$  e  $I_{cl}$ , optou-se por 0,1 para ambas. O valor de  $t_{clin}$  escolhido foi  $27^{\circ}\text{C}$ , pensando-se que este valor não será muito diferente do real.

A partir deste ensaio, chegou-se a valores de PMV e PPD de, respectivamente -0,33 e 8,16. Pode-se, assim, verificar que se trata de uma situação de conforto térmico. Quanto às incertezas expandidas, o valor da incerteza de PMV é de 0,41, sendo o da incerteza de PPD de 6,57.

As figuras que se seguem representam os histogramas de PMV e PPD para esta situação:

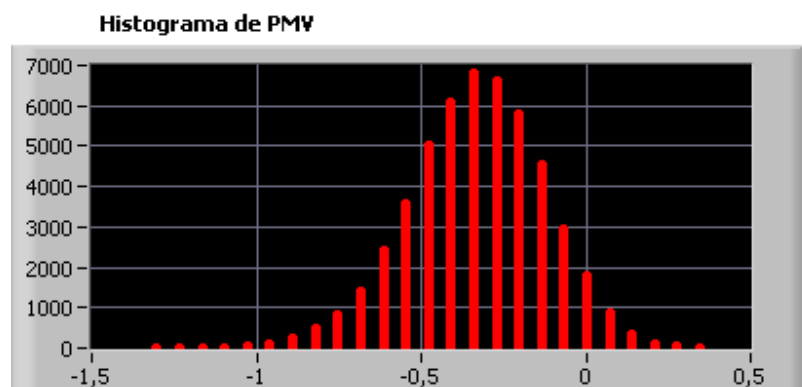


Fig. 10: Histograma de PMV para a situação padrão

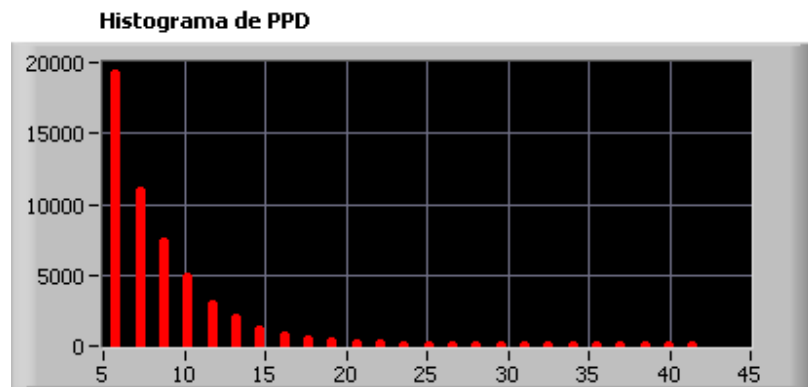


Fig. 11: Histograma de PPD para a situação padrão

Em anexo, encontra-se uma figura com o Front Panel, em LabView, da situação padrão analisada.

Para cada caso analisado, executaram-se vários ensaios, com o objectivo de comprovar os resultados. As tabelas que se seguem contêm um ou dois exemplos para cada caso, pretendendo estas ser uma amostra dos resultados obtidos.

Procedeu-se à execução de diversos ensaios em que se fez variar as variáveis de entrada (com excepção de  $W$ ), mantendo inalteradas as incertezas dessas mesmas variáveis, bem como o valor de  $t_{clin}$ .

Os resultados obtidos são visíveis na tabela que se segue:

W	M	Icl	Ta	Tr	Pa	Va	tclin	Inc M	Inc Icl	Inc Ta	Inc Tr	Inc Pa	Inc Va	PMV	Inc PMV	PPD	Inc PPD
0	1,2	1	20	20	1400	0,05	27	0,1	0,1	0,5	2	150	0,01	-0,33	0,4	8,15	6,48
0	0,8	1	20	20	1400	0,05	27	0,1	0,1	0,5	2	150	0,01	-1,98	0,8	73,25	32,66
0	4	1	20	20	1400	0,05	27	0,1	0,1	0,5	2	150	0,01	2,69	0,16	96,43	2,11
0	1,2	0,1	20	20	1400	0,05	27	0,1	0,1	0,5	2	150	0,01	-3,9	1,18	99,81	1,59
0	1,2	1,2	20	20	1400	0,05	27	0,1	0,1	0,5	2	150	0,01	0,01	0,35	5,64	1,85
0	1,2	1,6	20	20	1400	0,05	27	0,1	0,1	0,5	2	150	0,01	0,51	0,27	10,94	5,88
0	1,2	1	10	20	1400	0,05	27	0,1	0,1	0,5	2	150	0,01	-1,82	0,55	66,95	26,16
0	1,2	1	40	20	1400	0,05	27	0,1	0,1	0,5	2	150	0,01	1,74	0,29	63,93	15,23
0	1,2	1	20	10	1400	0,05	27	0,1	0,1	0,5	2	150	0,01	-1,44	0,5	48,02	25,87
0	1,2	1	20	25	1400	0,05	27	0,1	0,1	0,5	2	150	0,01	0,25	0,36	6,94	3,96
0	1,2	1	20	40	1400	0,05	27	0,1	0,1	0,5	2	150	0,01	2,09	0,28	80,23	11,47
0	1,2	1	20	20	500	0,05	27	0,1	0,1	0,5	2	150	0,01	-0,58	0,42	12,89	10,92
0	1,2	1	20	20	2200	0,05	27	0,1	0,1	0,5	2	150	0,01	-0,11	0,39	6,09	3,27
0	1,2	1	20	20	3000	0,05	27	0,1	0,1	0,5	2	150	0,01	0,1	0,38	5,98	2,54
0	1,2	1	20	20	1400	0,6	27	0,1	0,1	0,5	2	150	0,01	-1,04	0,48	28,75	21,16

Tabela 5: Apresentação de resultados – Diferentes valores de M, Icl, Ta, Tr, Pa e Va

A tabela que se segue compara os resultados obtidos na situação padrão, em que as incertezas de Ta, Tr e Pa são as assinaladas na norma ISO 7726/98 como ‘required’, e os valores resultantes de uma simulação em que se alteraram as incertezas de Ta, Tr e Pa para as patentes na norma ISO 7726/98 como ‘desirable’.

W	M	Icl	Ta	Tr	Pa	Va	tclin	Inc M	Inc Icl	Inc Ta	Inc Tr	Inc Pa	Inc Va	PMV	Inc PMV	PPD	Inc PPD
0	1,2	1	20	20	1400	0,05	27	0,1	0,1	0,5	2	150	0,01	-0,33	0,4	8,15	6,48
0	1,2	1	20	20	1400	0,05	27	0,1	0,1	0,2	0,2	300	0,01	-0,33	0,34	7,9	5,34

Tabela 6: Apresentação de resultados – Valores para as incertezas de Ta, Tr e Pa ‘required’ e ‘desirable’, da norma ISO 7726/98



Na tentativa de relacionar a incerteza expandida de PMV e PPD com as incertezas das variáveis de entrada, fez-se variar estas últimas, e observou-se as alterações no valor das primeiras.

A tabela seguinte mostra esta relação:

W	M	Icl	Ta	Tr	Pa	Va	tclin	Inc M	Inc Icl	Inc Ta	Inc Tr	Inc Pa	Inc Va	PMV	Inc PMV	PPD	Inc PPD
0	1,2	1	20	20	1400	0,05	27	0,1	0,1	0,5	2	150	0,01	-0,33	0,4	8,15	6,48
0	1,2	1	20	20	1400	0,05	27	0,01	0,1	0,5	2	150	0,01	-0,32	0,31	7,68	4,49
0	1,2	1	20	20	1400	0,05	27	1	0,1	0,5	2	150	0,01	-1,24	6,42	24,37	70,72
0	1,2	1	20	20	1400	0,05	27	0,1	0,01	0,5	2	150	0,01	-0,33	0,36	7,92	5,57
0	1,2	1	20	20	1400	0,05	27	0,1	0,4	0,5	2	150	0,01	-0,38	0,89	11,58	21,96
0	1,2	1	20	20	1400	0,05	27	0,1	0,1	0,2	2	150	0,01	-0,33	0,4	8,12	6,46
0	1,2	1	20	20	1400	0,05	27	0,1	0,1	2	2	150	0,01	-0,33	0,49	8,55	8,17
0	1,2	1	20	20	1400	0,05	27	0,1	0,1	0,5	0,2	150	0,01	-0,33	0,33	7,88	5,24
0	1,2	1	20	20	1400	0,05	27	0,1	0,1	0,5	3	150	0,01	-0,33	0,48	8,5	7,99
0	1,2	1	20	20	1400	0,05	27	0,1	0,1	0,5	2	10	0,01	-0,33	0,41	8,15	6,58
0	1,2	1	20	20	1400	0,05	27	0,1	0,1	0,5	2	200	0,01	-0,33	0,41	8,15	6,55
0	1,2	1	20	20	1400	0,05	27	0,1	0,1	0,5	2	150	0,02	-0,33	0,41	8,16	6,6

Tabela 7: Apresentação de resultados – Diferentes valores de inc M, inc Icl, inc Ta, inc Tr, inc Pa e inc Va

Simularam-se, ainda, situações em que não se verifica conforto térmico, por calor e por frio.

As variáveis de entrada correspondentes a estes ambientes, bem como os resultados obtidos estão patentes na seguinte tabela:

W	M	Icl	Ta	Tr	Pa	Va	tclin	Inc M	Inc Icl	Inc Ta	Inc Tr	Inc Pa	Inc Va	PMV	Inc PMV	PPD	Inc PPD
0	1,2	1	20	20	1400	0,05	27	0,1	0,1	0,5	2	150	0,01	-0,33	0,4	8,15	6,48
0	2,5	0,6	25	39	1600	0,3	27	0,1	0,1	0,5	2	150	0,01	2,58	0,18	94,81	3,26
0	1,2	1,4	33	40	1400	0,1	27	0,1	0,1	0,5	2	150	0,01	3,69	0,28	99,90	0,04
0	1	0,8	15	15	1400	0,05	27	0,1	0,1	0,5	2	150	0,01	-3,3	0,86	99,12	3,68
0	0,8	1,2	10	20	2000	0,2	27	0,1	0,1	0,5	2	150	0,01	-3,7	0,58	99,77	1,54

Tabela 8: Apresentação de resultados – Situações de calor e frio

Observou-se que, de uma forma geral, a incerteza de PMV é bastante inferior à incerteza de PPD. A primeira varia entre 0,16 e 6,48, enquanto que a segunda varia entre 0,04 e 70,72.

Alterando as variáveis de entrada (modificando o tipo de ambiente), obtêm-se valores de PMV e, conseqüentemente, de PPD diferentes.

As incertezas de PMV e PPD variam com a variação destes índices, não havendo, no entanto, nenhuma relação entre um aumento ou diminuição de PPD e respectivo aumento ou diminuição da sua incerteza.

Relativamente ao PMV, observou-se que, de uma forma geral, um aumento deste índice acarreta uma diminuição da sua incerteza, bem como que, ao baixar o seu valor, a incerteza que lhe está associada aumenta.

Observou-se, ainda, que a variação de  $P_a$  não implica alterações na incerteza do PMV, ainda que este índice varie.

No que diz respeito às alterações das incertezas das variáveis iniciais, verificou-se que, com excepção das situações em que há um aumento da incerteza de  $M$  ou diminuição da incerteza de  $I_{cl}$ , este tipo de variação não influencia o valor de PMV nem, de forma significativa, de PPD.

Quanto às incertezas de PMV, verificou-se que estas se mantêm praticamente constantes, excepto para um aumento da incerteza de  $M$ , em que se observa um aumento significativo da incerteza de PMV, e para uma diminuição da incerteza de  $I_{cl}$ , em que também se verifica um aumento da incerteza de PMV, ainda que bastante menor.

Observou-se, ainda, um ligeiro aumento da incerteza de PMV para um aumento de incerteza de  $T_a$  e  $T_r$  e uma pequena diminuição da incerteza de PMV, para uma diminuição da incerteza de  $M$  e  $T_r$ .

Relativamente à incerteza de PPD, observou-se que, de uma maneira geral, um aumento ou diminuição de PPD (ainda que de forma reduzida), é acompanhado por um aumento ou diminuição da sua incerteza.

Verificou-se, também, que um aumento da incerteza de  $M$ ,  $I_{cl}$ ,  $T_a$  e  $T_r$  levam a um aumento da incerteza de PPD, enquanto que uma diminuição da incerteza destas variáveis (à excepção de  $T_a$ ) leva a uma diminuição da incerteza de PPD.

Comparando os resultados para os valores 'required' e 'desirable' relativos à incerteza de  $T_a$ ,  $T_r$  e  $P_a$ , da norma ISO 7726/98, observa-se que tanto a incerteza de PMV como a de PPD são

ligeiramente inferiores quando as incertezas respeitam os valores ‘desirable’, em relação aos valores ‘required’.

Em relação às situações de calor, a incerteza de PMV diminuiu (ligeiramente), não sendo bem como a incerteza de PPD. Verificou-se, também, um aumento de PMV e de PPD.

Quanto às situações de frio, observou-se que a incerteza de PMV aumentou e a de PPD diminuiu, tendo havido variações contrárias dos próprios índices.

## 5. CONCLUSÕES

### 5.1 Contribuições do presente trabalho

Um maior número de ciclos simulados leva a uma maior precisão de resultados. No entanto, tendo sido testadas simulações com 5.000, 10.000 e 50.000 ciclos, não se verificaram alterações significativas entre elas.

Concluiu-se que, de uma forma geral, os níveis de incerteza de PMV são substancialmente inferiores aos da incerteza de PPD. Isto deve-se às diferentes gamas de valores para os dois índices: no caso de PMV, vai de -3 a 3; enquanto que para PPD, vai de 0 a 100%.

Concluiu-se, ainda, que há uma muito maior tendência da incerteza de PPD para variar com a alteração das condições iniciais de cálculo, comparativamente à incerteza de PMV, sendo que a primeira varia numa faixa de valores bastante superior à segunda.

É possível concluir que a escolha das variáveis de entrada  $M$ ,  $I_{cl}$ ,  $T_a$ ,  $T_r$  e  $V_a$  implica variações na incerteza de PMV (em sentido oposto ao da variação do próprio PMV) e na incerteza de PPD. A grandeza  $P_a$  não influencia a incerteza de PMV.

Verifica-se que não há uma relação significativa entre a variação das incertezas das variáveis iniciais e a variação da incerteza dos índices PMV e PPD.

No que diz respeito às incertezas das variáveis iniciais, conclui-se haver influência da variação da incerteza de  $M$  e  $I_{cl}$  na variação da incerteza de PMV e PPD.

As incertezas de  $T_a$  e  $T_r$  têm, também, ainda que de forma bastante reduzida, alguma influência na variação da incerteza final do cálculo.

Conclui-se, também, que tanto a incerteza de PMV como a de PPD são ligeiramente inferiores quando as incertezas respeitam os valores ‘desirable’, da norma ISO 7726/98, em relação aos valores ‘required’.

No caso da simulação de uma situação de calor, a variação das variáveis iniciais leva a um aumento de PMV e PPD, e a uma diminuição da incerteza de PMV e PPD. Alterando diferentes variáveis de entrada ao mesmo tempo, de maneira a criar um ambiente em que se sente frio, o índice PMV diminui e PPD aumenta. As incertezas variam em sentido contrário à variação dos respectivos índices de conforto térmico.

Assim, é possível concluir que as incertezas relativas ao cálculo de PMV e PPD dependem em maior escala da escolha das variáveis iniciais e não tanto da incerteza dos seus instrumentos de medição ou cálculos.

## **5.2 Sugestões para desenvolvimento futuro**

Seria bastante interessante prolongar o estudo feito, introduzindo como variáveis de entrada a temperatura operativa, a temperatura equivalente e a temperatura efectiva.

Um outro aspecto que poderia ser contemplado num trabalho futuro é a execução de ensaios experimentais, de modo a tornar as variáveis de entrada e, consequentemente, as situações analisadas, mais próximas da realidade.

## BIBLIOGRAFIA

- ABNT, *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição*, 2ª edição, INMETRO, 1998
- A. MONJALLON, *Instructions à la Méthode Statistique*, Sixième Édition, Paris, 1969
- ASHRAE Fundamentals Handbook 2001
- B. BUCHWEITZ e P. H. DIONÍSIO, *Manual de Laboratório de Óptica Experimental*, IF-UFRGS, 1994
- B. DÉMIDOVITCH e I. MARON, *Éléments de calcul numérique*, Éditions Mir, Moscou, 1973
- Directiva Comunitária 2007/589/CE
- FERNANDES, A. F., *Verificação da temperatura de pele para pessoas em conforto em uma sala de controle*, Porto Alegre, 2004
- GAMEIRO DA SILVA, M. C., «Aplicações computacionais para avaliação do conforto térmico», Coimbra, 2007
- GAMEIRO DA SILVA, M. C., «RSECE – Regulamento dos sistemas energéticos de climatização em edifícios. Conforto térmico», Edição 1, Coimbra, 2007
- INNOVA, *Air tech Instruments* – Thermal Comfort
- ISO 7726:1998(E), Ergonomics of the thermal environment – Instruments for measuring physical quantities
- ISO 7730:2005(E), Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of the thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria
- ISO 10551:1995, Ergonomics of the thermal environment – Assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgement scales
- J. P. PELLETIER, «Techniques Numériques Appliquées au Calcul Scientifique», Masson et C. Éditeurs, Paris, 1971
- [http://www.eurachem.fc.ul.pt/Guia\\_Eurachem\\_P.pdf](http://www.eurachem.fc.ul.pt/Guia_Eurachem_P.pdf)
- <http://www.learn.londonmet.ac.uk/packages/clear/thermal/people/requirements/analytical/pmv.html>

<http://www.labee.ufsc.br/arquivos/publicacoes/Apconf.pdf>

NILSSON, HAKAN O., «Evaluation and Visualisation of Perceived Thermal Condition»,  
*European Journal of Applied Physiology*, Springer Berlin, Heidelberg, September 2004, 714-716

[www.prof2000.pt/users/eta/Amb\\_Termico.htm](http://www.prof2000.pt/users/eta/Amb_Termico.htm)

# ANEXO A

## FRONT PANEL – SITUAÇÃO PADRÃO

Incerteza do cálculo de M (Met)

0,1

Incerteza do cálculo de Icl (Clo)

0,1

Incerteza do Termómetro para Ta (°C)

0,5

Incerteza do Termómetro para Tr (°C)

2

Incerteza do Higrómetro (Pascal)

150

Incerteza do Anemómetro (m/s)

0,01

W (Met)

0

M (Met)

1,2

Ta (°C)

20

Tr (°C)

20

pa (Pascal)

1400

Icl (Clo)

1

Va (m/s)

0,05

tcl in (°C)

27

Nº ensaios

50000



Coluna PMV

4967

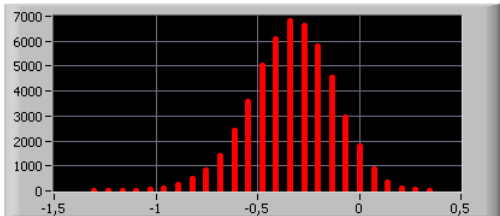
0,0620542

Coluna PPD

4989

9,57431

Histograma de PMV



Média PMV

-0,33

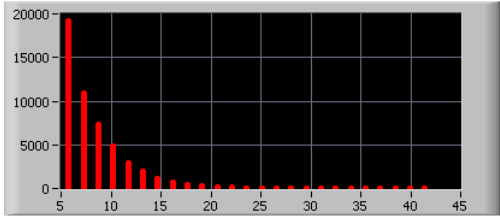
Desv. Padrão PMV

0,201

Incerteza cálculo PMV

0,4

Histograma de PPD



Média PPD

8,15

Desv. Padrão PPD

3,241

Incerteza cálculo PPD

6,48